

Une Approche Globale D'optimisation des Structures Métalliques avec les Algorithmes Génétiques

Nizar Bel Hadj Ali

LOCIE – Université de Savoie, Savoie Technolac, 73376 Le Bourget du Lac cedex

RESUME. En Construction Métallique, les contraintes de temps et de ressources obligent les concepteurs à limiter le nombre de configurations à considérer en phase précoce de conception ce qui rend difficile l'optimisation globale des coûts de réalisation des structures. Nous proposons ici une méthode d'optimisation pour la conception globale des structures métalliques. L'objectif étant de minimiser leur coût global de production. La méthode est basée sur l'application des Algorithmes Génétiques. Les contraintes de conception sont formulées à la base de la réglementation Eurocode 3 et elles sont prises en compte dans l'AG à travers une fonction de pénalisation. Les variables de conception sont constituées par les caractéristiques dimensionnelles des différents éléments, le type des assemblages et le type des appuis. Des résultats d'optimisation seront présentés pour décrire la méthodologie proposée.

MOTS-CLÉS : Conception Globale, Optimisation de Structures, Algorithmes Génétiques.

ABSTRACT. The overall design of steel structures related to the definition of structural joints, connections and supports plays an important role in the analysis of steel structures and affects considerably its whole production cost. However, due to time and resource constraints, structural designers tend to limit the range of alternative configurations considered especially in early design. A genetic algorithm based optimisation method is presented for the overall design of steel structures. In the objective function, the whole production cost is minimised. The design constraints are formulated according to Eurocode3 and are handled through the concept of penalty function. Three design variables are considered: cross-sectional size of members, the type of beam-to-column connections and the type of supports. Optimisation results are shown to illustrate the proposed methodology and appropriate conclusions are drawn.

KEYWORDS : Overall Design, Structural Optimisation, Genetic Algorithms.

1. INTRODUCTION

Dans le cycle de vie d'une structure métallique, la phase de conception est souvent le lieu de discontinuités qui empêchent l'optimisation globale des coûts de production. Durant cette phase, différents traitements techniques ont lieu pour vérifier la faisabilité de l'ouvrage, au regard de contraintes structurelles, de voisinage, de mise en œuvre, etc. Cependant, ces vérifications ont lieu une fois que le concepteur a effectué les choix principaux sur la forme de l'ouvrage, la disposition des différents composants, le système porteur, le système de fondation, etc. Ces choix influencent d'une façon considérable les caractéristiques techniques et économiques du projet et la réalisation de l'ouvrage. En effet, on constate qu'une part significative (70-80 %) du coût total du projet est mise en jeu à cette étape du processus de production en Construction Métallique (Rafiq, 2000). Il est donc nécessaire de s'assurer que les décisions prises au cours de cette phase soient cohérentes. Par contre, lorsque l'intégration des contraintes techniques en amont est insuffisante, elle conduit parfois à des incohérences et nécessite la remise en question des solutions proposées en amont. Ce qui peut être la source de coûts supplémentaires et de retards dans la réalisation.

L'approche traditionnelle d'optimisation des structures métalliques est basée sur la minimisation du poids de la structure. Cependant, les assemblages dépassent rarement les 5 % du poids total d'une

ossature. Ce faible pourcentage cache en réalité un coût élevé pouvant aller jusqu'à 30 % du coût total de fabrication de la structure (Hamchaoui, 1997). En effet, le prix d'une ossature est constitué majoritairement par le coût de la main d'œuvre qui dépend essentiellement de la complexité des assemblages. Une définition optimisée de la structure, effectuée à la base du seul critère poids, peut donc donner lieu à des dispositions constructives loin d'être optimales en termes de coût de réalisation.

D'autre part, la modélisation des assemblages peut affecter, de manière sensible, la répartition des efforts intérieurs dans la structure et également les efforts à reprendre dans les fondations. C'est la raison pour laquelle l'Eurocode 3 (à travers son Document d'Application Nationale) permet maintenant l'utilisation et la justification des assemblages semi-rigides. L'objectif étant de s'approcher, le plus possible, du comportement réel des assemblages. La prise en compte du comportement des nœuds lors de l'analyse globale est un aspect novateur mais prometteur. Les mérites économiques de cette approche ont fait l'objet de diverses analyses comparatives (Colson *et al*, 1996). Sa mise en œuvre se trouve largement facilitée par les logiciels d'analyse appropriés déjà disponibles sur le marché (Galea *et al*, 1998) et les divers aides au calcul, permettant de caractériser les nœuds (Jaspart, 1994).

L'optimisation du processus de conception globale des structures métalliques passe donc par l'anticipation des problèmes de construction plus en amont dans les phases précoces de conception. Pour cela nous avons élaboré une méthodologie d'optimisation basée sur la minimisation du coût global de réalisation de la structure. Ce coût intègre les coûts matière, fabrication et montage de la superstructure métallique ainsi que les coûts matière et réalisation des systèmes de fondation. Cette approche d'optimisation globale tient compte en plus des caractéristiques dimensionnelles des éléments, de la nature des appuis et de la conception des assemblages. L'optimisation est basée sur l'application des Algorithmes Génétiques.

2. FORMULATION DU PROBLEME DE CONCEPTION GLOBALE

Le problème de la conception globale des structures métalliques peut être posé comme un problème d'optimisation qui consiste à minimiser le coût global de la structure en respectant les contraintes de dimensionnement définies par la réglementation Eurocode 3 et formulées ci-dessous :

- **la résistance des sections transversales :**

$$\frac{N_{sd,i}}{N_{R,i}} + \frac{M_{sd,i}}{M_{R,i}} \leq \gamma_M \text{ pour } i = 1, \dots, n \text{ où } n : \text{nombre d'éléments ;} \quad [\text{Eq.1}]$$

N_{sd} : effort normal de calcul ; N_R : effort normal résistant ;

M_{sd} : moment fléchissant de calcul ; M_R : moment fléchissant résistant ; γ_M : facteur partiel de sécurité ;

- **la stabilité au flambement des éléments :**

$$\frac{N_{sd,i}}{\chi_i \cdot N_{R,i}} + \frac{k_i \cdot M_{sd,i}}{M_{R,i}} \leq 1 \text{ pour } i = 1, \dots, np \text{ avec } np : \text{nombre de poteaux ;} \quad [\text{Eq.2}]$$

χ : coefficient de flambement ; k : coefficient de moment ;

- **la limitation des déformations des éléments fléchis :**

$$v_i \leq v_{lim,i} \text{ pour } i = 1, \dots, nb \text{ avec } nb : \text{nombre de poutres ;} \quad [\text{Eq.3}]$$

v_i : déformation d'un élément par rapport à la ligne de ses appuis ;

- **La limitation des déformations horizontales d'ossatures :**

$$u_i \leq u_{\lim,i} \text{ pour } i=1, \dots, nn \text{ avec } nn : \text{nombre de nœuds ;} \quad [\text{Eq.4}]$$

u_i : déplacement horizontal en tête de poteau.

2.1. EVALUATION DU COUT DE PRODUCTION D'UNE STRUCTURE METALLIQUE

Le coût global de la structure est composé par deux entités élémentaires : le coût de la superstructure métallique et le coût des fondations. Le coût de la superstructure inclut le coût des profils, des éléments d'assemblage poutre-poteaux, des attaches en pieds de poteaux, le coût de fabrication en atelier des différents composants ainsi que le coût de montage sur chantier. Le coût des fondations est composé par le coût des terrassements, des matériaux et de la réalisation des fondations.

2.1.1. Le coût matière

Le coût matière de la superstructure inclut le coût des profils et des assemblages. Le coût matière des assemblages est la somme des coûts élémentaires des différents composants des assemblages et des éléments d'attache en pieds de poteaux (platines, boulons, cornières, raidisseurs, goujons, etc.).

2.1.2. Le coût de fabrication et de montage

Le coût de fabrication en atelier des différents éléments de la structure est obtenu par décomposition en coûts de revient élémentaires d'opérations d'exécution. Le chiffrage des coûts unitaires s'effectue à travers l'estimation des temps d'opération, puis par l'application d'un coût horaire global par opération.

La durée d'une opération de production en atelier est la somme des temps unitaires d'exécution intégrant la préparation, la fabrication et la manutention. Le coût horaire global correspond au coût de main d'œuvre et au coût d'exploitation des machines pour chacune des opérations de fabrication dans l'atelier. L'estimation des durées d'exécution est basée sur le modèle d'évaluation économique proposé par Hamchaoui (Hamchaoui *et al*, 1998) et établie à la base de chronométrages en atelier des opérations élémentaires de production (sciage, oxycoupage, usinage de trous, soudage, etc.). Ce modèle a été actualisé et complété pour être utilisé comme outil d'évaluation économique représentatif et fiable dans cette étude (figure 1).

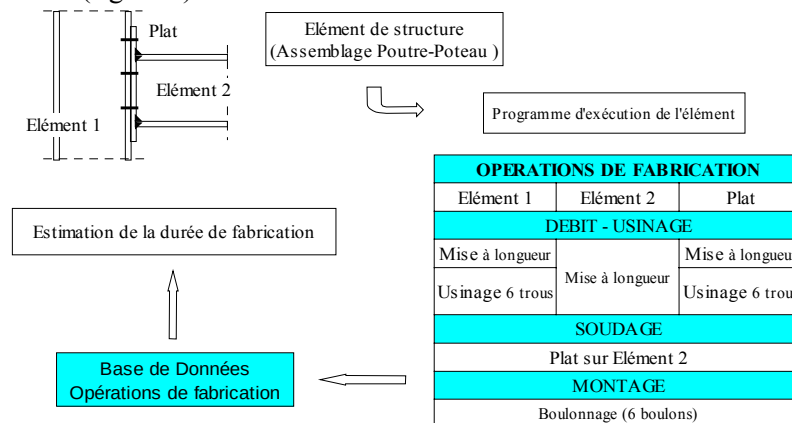


Figure 1 : Evaluation du coût de fabrication d'un élément de structure.

2.1.3. Le coût des fondations

Le coût des fondations est composé de deux entités élémentaires : le coût des terrassements (fouilles en rigole ou en puits) et le coût de réalisation des fondations qui comprend : la fabrication et le coulage du béton, le coffrage éventuel et le ferrailage.

2.2. LES VARIABLES D'OPTIMISATION

Les variables de conception, permettant de générer les différentes solutions de conception d'une structure, sont de trois types : les caractéristiques dimensionnelles des éléments, le type des assemblages entre ces derniers (assemblages poutre-poteau, poutre-poutre, etc..) et le type des liaisons entre les poteaux et les massifs de fondation.

2.2.1. Les caractéristiques dimensionnelles des éléments

Les éléments de la structure seront choisis dans des listes de profilés standards. Dans cette étude, les poutres seront choisies dans une liste de 18 éléments de poutrelles IPE avec une hauteur variant de 80 à 600 mm. Pour les poteaux, on va considérer des poutrelles de type HEB avec une hauteur variant de 100 à 600 mm. Ce choix nous permettra par la suite de déterminer facilement les caractéristiques de flexion et de rigidité des assemblages.

2.2.2. Le type des appuis

Pour les appuis de la structure, nous allons considérer les deux configurations suivantes :

- 1 : pied de poteau articulé (poteau fixé par une platine d'extrémité seule);
- 2 : pied de poteau encastré (poteau fixé par une platine d'extrémité raidie);

2.2.3. Le type des assemblages

Pour les assemblages poutre-poteau on va considérer les cinq types d'assemblages de la figure 2. Le nombre de configurations a été délibérément limité aux types d'assemblages les plus utilisés en Europe. Les caractéristiques principales de ces assemblages en termes de flexibilité et de résistance sont déterminées à la base du modèle SPRINT (Jaspart, 1994).

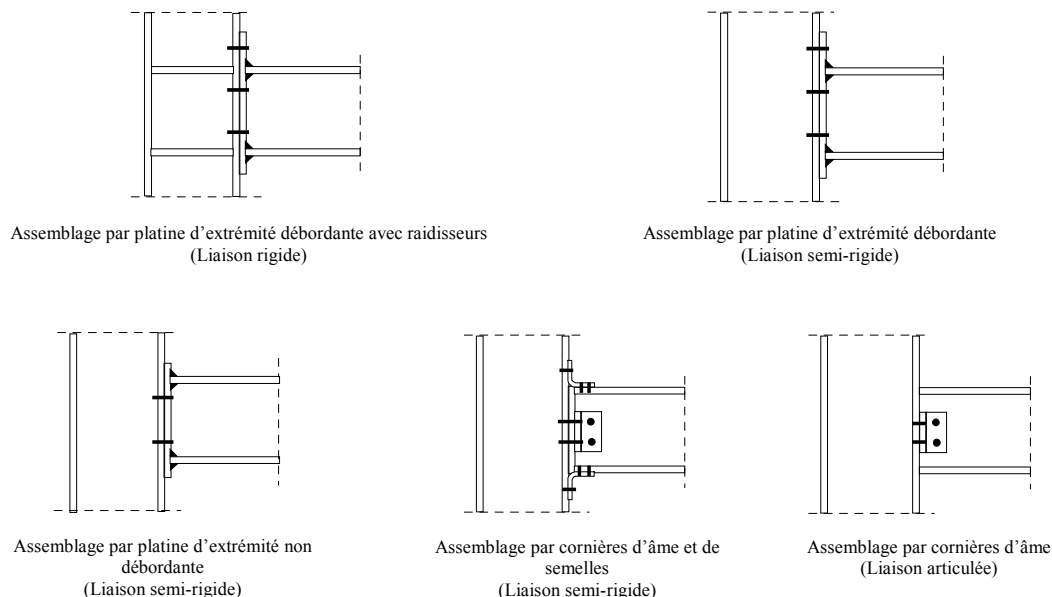


Figure 2 : Les types d'assemblages étudiés.

3. OPTIMISATION GLOBALE DES STRUCTURES METALLIQUES

Pour le problème de conception globale, la non-linéarité de la fonction objectif et des contraintes ainsi que le caractère discret des variables de conception nous obligent à écarter d'emblée les

méthodes de type : gradient ou de programmation linéaire, dynamique ou non-linéaire. D'autre part, la prise en compte simultanée de trois types de variables d'optimisation augmente considérablement la taille de l'espace de recherche.

Les raisons citées ci-dessus, justifient le recours à des heuristiques pour résoudre le problème de conception globale. Ainsi nous proposons ici une approche basée sur l'application des Algorithmes Génétiques. Les AG s'inspirent des mécanismes de l'évolution darwinienne et de la Génétique Moderne, ils sont utilisés comme outil d'optimisation ou de recherche combinatoire. La première formulation rigoureuse des principes généraux des algorithmes génétiques est due à John H. HOLLAND. On peut également considérer avec beaucoup d'intérêt les travaux de Goldberg (1989) qui proposent les développements les plus récents.

3.1. METHODOLOGIE DE RECHERCHE DE LA CONCEPTION OPTIMALE PAR AG

Les AG ont été utilisés récemment pour la résolution de certains problèmes d'optimisation de structure où ils ont montré de nombreux avantages par rapport aux méthodes classiques d'optimisation. Néanmoins, ces algorithmes conviennent mieux, par définition, aux problèmes d'optimisation sans contraintes. Plusieurs techniques ont été utilisées pour la prise en compte des contraintes dans les AG (Hasançebi *et al*, 2000). Une solution courante consiste à intégrer à la fonction d'évaluation des pénalités pour les individus qui ne respectent pas les contraintes. Ces pénalités dépendent en général du nombre et/ou de « l'importance » des contraintes violées.

Parmi les différentes formes de pénalisation, nous avons choisi une forme simplifiée qui consiste à utiliser une normalisation des contraintes visant à leur donner le même poids dans la fonction objectif. Une contrainte s'écrivant sous la forme :

$$f_i(I, X_a, X_n) \leq b_i \quad [\text{Eq.5}]$$

peut être transformée sous la forme normalisée suivante :

$$g_i(I, X_a, X_n) = \frac{f_i}{b_i} - 1 \leq 0 \quad [\text{Eq.6}]$$

Avec I, X_a, X_n : les vecteurs des variables de conception.

Cette méthode de pénalisation permet de minimiser sans contraintes la fonction F suivante :

$$F = C \left(1 + K \sum_{i=1}^m P_i \right) \quad [\text{Eq.7}]$$

où C est la fonction objectif *coût* du problème initial, K est une constante à choisir selon le problème et P_i est la valeur de la pénalisation évaluée de la façon suivante :

$$P_i = \begin{cases} g_i & \text{si } g_i > 0 \\ 0 & \text{si } g_i \leq 0 \end{cases} \quad \text{avec } i = 1, \dots, m : \text{nombre total de contraintes.} \quad [\text{Eq.8}]$$

3.2. CODAGE DES STRUCTURES

Chaque solution de conception possible est codée dans l'AG par un chromosome constitué des trois parties correspondantes aux trois types de variables d'optimisation. Chacune de ces trois parties est constituée d'autant de gènes que de variables de conception dans une structure. La figure 3 montre la structure d'un chromosome destiné au codage d'un portique à deux étages.

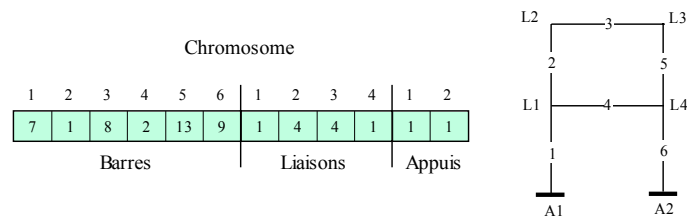


Figure 3 : Définition d'un chromosome.

3.3. DEROULEMENT DE L'AG

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes itératifs qui suivent le schéma classique des algorithmes évolutionnistes. Leur fonctionnement comprend les étapes suivantes :

- (1) **Génération de la population initiale** : A l'initialisation de l'algorithme, une population de taille fixée est générée aléatoirement. Elle est en général répartie uniformément sur l'espace de recherche. Chaque individu est ensuite évalué sur la base de la fonction objectif F qui constitue la fonction « fitness » du chromosome.
- (2) **Sélection** : Pour la génération k , une sélection au hasard par roue de loterie nous permet de reproduire une partie de la population en fonction de la fitness de chaque individu : plus la fitness d'un individu est élevée, plus il sera reproduit dans la nouvelle population. On a ajouté un principe d'élitisme dans le processus de sélection destiné à conserver systématiquement le meilleur individu de la population courante dans la génération suivante.
- (3) **Croisement** : On choisit des couples d'individus parents au hasard dans cette nouvelle population et on leur applique, avec une certaine probabilité (P_c), l'opérateur de croisement. Durant cette opération, un point de croisement est choisi aléatoirement sur les deux chromosomes ; on intervertit alors les parties des parents de part et d'autre du point de croisement pour former deux nouveaux individus. Les enfants remplacent alors les parents dans la population de la génération $k+1$. L'opérateur de croisement est traditionnellement l'heuristique prépondérante d'un Algorithme Génétique.
- (4) **Mutation** : On applique ensuite l'opérateur de mutation à chaque individu avec la probabilité P_m , qui est en général choisie avec un ordre de magnitude plus faible que P_c . L'opérateur classique de mutation choisit aléatoirement un locus sur le chromosome et remplace la valeur du gène choisi par une autre du même domaine. Les mutants remplacent alors leurs parents dans la nouvelle génération $k+1$.
- (5) Les individus qui n'ont subi ni croisement ni mutation sont recopiés tels quels dans la nouvelle population.
- (6) On réitère ces opérations à partir de la 2^e étape jusqu'à ce qu'un certain critère d'arrêt soit satisfait. Différents critères d'arrêt de l'Algorithme Génétique peuvent être retenus : nombre de générations fixé (temps constant), convergence de la population, population n'évoluant plus suffisamment,...

4. OPTIMISATION DE LA CONCEPTION D'UN PORTIQUE A DEUX ETAGES

La méthode d'optimisation présentée est utilisée pour rechercher la conception optimale du portique à deux étages de la figure 4. Les variables d'optimisation sont les trois groupes de barres (B1, B2 et B3), les deux groupes de liaisons (L1 et L2) et les trois appuis de la structure (A1, A2 et A3).

L'analyse de la structure est faite moyennant le programme PEPMicro (Galea et al, 1994). Cette analyse nous permet de déterminer les sollicitations agissant sur les différents éléments de la structure ainsi que les déplacements de ses nœuds. La détermination des caractéristiques de rigidité et de résistance des liaisons semi-rigides est effectuée à la base du modèle simplifié « SPRINT » (Jaspart, 1994).

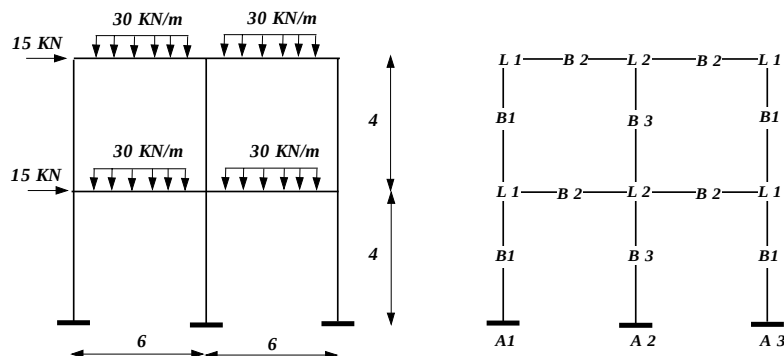


Figure 4 : Structure étudiée et désignations des différentes variables de conception.

Différents tests, nous ont permis de définir les paramètres de notre AG : la taille de la population (100), le nombre total de générations (200), la probabilité de croisement (0.8) et la probabilité de mutation (0.15) (Bel Hadj Ali *et al*, 2002). Les résultats d'optimisation de la structure sont présentés au tableau 1. On compare ici la solution de conception avec des assemblages classiques (assemblages articulés ou encastrés) avec la solution obtenue en adoptant une modélisation semi-rigide des assemblages. On constate que la production de la solution S2 est plus chère d'environ 16 %. La figure 6 présente la répartition du gain réalisé dans les différents postes de production de la structure.

Tableau 1 : Comparaison des résultats d'optimisation pour la structure étudiée.

Variables	S1 : Solution de conception avec des assemblages semi-rigides	S2 : Solution de conception avec des assemblages classiques
Barres : B1-B2-B3	HEB 160 – IPE 270 – HEB 100	HEB 160 – IPE 300 – HEB 100
Appuis : A1-A2-A3	Encastré – Articulé – Encastré	Encastré – Articulé – Encastré
Liaisons : L1-L2	L1 : assemblage par cornières d'âme et de semelles; L2 : assemblage par cornières d'âme et de semelles;	L1 : assemblage par platine d'extrémité débordante avec raidisseurs ((liaison rigide); L2 : assemblage par platine d'extrémité débordante avec raidisseurs ((liaison rigide);
Coût total (Euros)	3498.0	4074.4
Coût Assemblages / Coût total	16.5 %	22.9 %
Coût Fondations / Coût total	14.1 %	12.0 %
Poids Assemblages / Poids total	4.6 %	6.2 %
Poids total (KN)	17.93	19.79

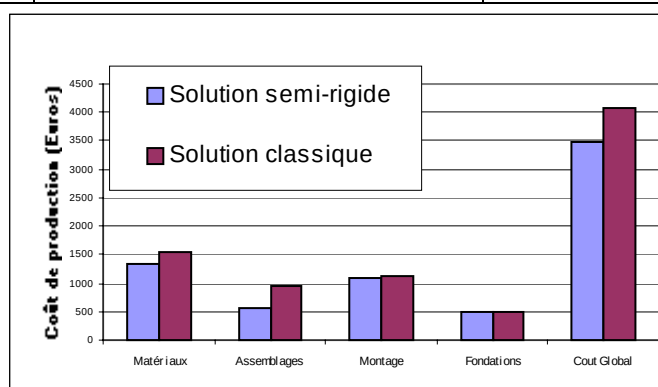


Figure 5 : Coûts relatifs des solutions de conception dans différents postes de production.

Cette comparaison permet de montrer que l'utilisation d'assemblages semi-rigides permet d'obtenir des gains sur le coût de réalisation global de la structure. En effet, l'utilisation d'assemblages classiques entraîne une plus grande complexité des assemblages, donc des coûts de réalisation plus élevés, sans apporter une optimisation significative au niveau de la taille des profils utilisés ou sur les efforts à transmettre aux fondations.

5. CONCLUSION

Les premiers résultats d'optimisation présentés dans cet article, montrent que l'utilisation des AG pour la résolution du problème de conception globale des structures métalliques est une approche très prometteuse. D'autre part, nous avons pu mettre en évidence les avantages économiques de notre approche d'optimisation du coût global des structures. Ces avantages proviennent à la fois d'un gain de poids et d'une simplification des assemblages. La méthodologie que nous venons de décrire dans cet article est actuellement utilisée en simulation sur un certain nombre de structures types. Les résultats sont exploités en vue de la formulation de règles de conception globale des structures métalliques en phase précoce de conception.

BIBLIOGRAPHIE

- Bel Hadj Ali N., Mangin J.C., Cutting-Decelle A.F., (2002) Optimisation of the steel structures design with genetic algorithms. *Proc. of the 3rd international conference in decision making in urban and civil engineering*. London, 6-8 November 2002.
- Colson A., Hottier J.M., Moricet A. (1996) Modèle simplifié d'assemblages semi-rigides – Analyse économique comparative. *Revue de la Construction Métallique*, 4, 55-67.
- Galea Y., Bureau A., (1998) *PEPMicro - Analyse plastique au second ordre de structures planes à barres – Manuel d'utilisation*, CTICM, France.
- Goldberg D.E. (1989) *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Learning*. Addison Wesley.
- Hamchaoui M., Mangin J.C., Cutting-Decelle A.F. (1998) Un modèle de calcul du coût des assemblages en vue d'une conception économique en Construction Métallique. *Revue de la Construction Métallique*, 4, 5-20.
- Hamchaoui M. (1997) *Conception économique des assemblages en Construction Métallique*. Thèse de doctorat, Université de Savoie, France.
- Hasançebi O., Erbatur F. (2000) Constraint handling in genetic algorithm integrated structural optimization, *Acta mechanica*, 139, 15-31.
- Jaspart J.P. (1994) Steel moment connections according to Eurocode3, Simple design aids for rigid and semi-rigid joints. In: *COST C1 – Proceedings of the second state of the art workshop*, Prague, 159-167.
- Rafiq M. Y. (2000) A design support tool for optimum building concept generation using a structured genetic algorithm. *International Journal of Computer Integrated Design and Construction*, Volume 2, N°2, 92-102.